Вестник Донского государственного технического университета. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006. 2018. Т. 18, № 1, с. 77–84
Vestnik of Don State Technical University. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006 2018. Vol. 18, no. 1, pp. 77–84

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 662.74: 547. 652 10.23947/1992-5980-2018-18-1-77-84

Построение математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10}*

Е. Н. Степанов[1], А. Н. Смирнов[2], Д. И. Алексеев[3]**
[1] ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Российская Федерация
[2, 3] Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

Construction of mathematical models to predict M_{25} and M_{10} coke quality indices***

E. N. Stepanov[1], A. N. Smirnov[2], D. I. Alekseev[3]**
[1] PAO “Magnitogorsk Iron & Steel Works”, Magnitogorsk, Russian Federation
[2, 3] Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Введение. Разработаны математические модели для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10}. Расчеты выполнены индивидуально для каждой из коксовых батарей коксохимического производства (КХП) Магнито горского металлургического комбината (ММК). В основе моделирования — параметры шихты: сумма отощающих компонентов ОК, %; отражательная способность витринита R_0, %. Такие модели необходимы при управлении качеством продукции и оптимизации, направленной на снижение производственных затрат. Цель исследования — построение адекватных математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} в условиях КХП ММК. Таким образом, предполагается, что ММК получит собственные модели, не уступающие по точности прогнозирования аналогам, используемым другими коксохимическими предприятиями России.

Материалы и методы. В качестве универсального аппроксиматора для построения математических моделей использовались нейронные сети. При выборе их архитектуры исходили из минимального количества нейронов и слоев сети. Кроме того, учитывалась минимизация ошибки прогнозирования на новой выборке, которая не использовалась при обучении и тестировании.

Результаты исследования. Разработка основана на петрографических параметрах шихты: суммы отощающих компонентов ОК (по ГОСТ 12112); показатель отражения витринита в шихте R_0 (ГОСТ 12113). С помощью искусственных нейронных сетей построены одномерные математические модели для прогнозирования показателей качества кокса на дробимость M_{25} и истираемость M_{10} (ГОСТ 5953). Созданные модели представлены в графическом виде. Оценены их прогнозирующие способности.

Обсуждение и заключения. В моделях, разработанных в рамках данного исследования, использованы только петрографические параметры шихты. Не учитывались совокупные данные по техническому и пластометрическому

Introduction. Mathematical models are developed to predict M_{25} and M_{10} coke quality. The calculations are carried out specifically for each of the coke batteries of the coke-chemical production (CCP) of Magnitogorsk Iron & Steel Works (MMK). The simulation is based on the charge factors: sum of inert components OK, %; vitrinite reflectance R_0, %. These models are required to control the product quality and the optimization aimed at cost saving. The study objective is to construct adequate mathematical models for predicting M_{25} and M_{10} coke quality indices under the conditions of MMK CCP. Thus, it is assumed that MMK will obtain its own models that are highly competitive in forecast precision with the analogues used by other coke-chemical enterprises of Russia.

Materials and Methods. Neural networks are used as a universal approximation for constructing mathematical models. When selecting their architecture, the authors emanated from the minimum number of neurons and the network layers. In addition, the minimization of the predictive error on a new sample was taken into account which was not used in training and testing.

Research Results. The development is based on the petrographic charge factors: sum of inert components OK (according to GOST 12112); vitrinite reflectance R_0, (GOST 12113). With the help of artificial neural networks, one-dimensional mathematical models are constructed to predict impact coke strength indices of M_{25} and abrasion capacity of M_{10} (GOST 5953). The developed models are presented in a graphical form. Their predictive force is estimated.

Discussion and Conclusions. In the models developed within the framework of this study, only petrographic charge factors are used. The aggregate data on technical and plastometric analysis are not taken into account. This is the basic difference

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: stepanov.en@mmk.ru, sman@magtu.ru, alekseev41047@mail.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

анализам. Этим подход, представленный в данной статье, отличается от моделей, реализованных для других КХП, — например, на Нижнетагильском металлургическом комбинате (НТМК), Новокузнецком металлургическом комбинате (НКМК), Западно-Сибирском металлургическом комбинат (ЗСМК). Несмотря на это, доказана адекватность полученных зависимостей. Предполагается использовать их для оптимизации петрографических параметров шихты по различным критериям оптимальности показателей качества кокса.

of the approach presented in this paper from the models implemented for other CCP, for example, at Nizhny Tagil Iron & Steel Works (NTMK), Novokuznetsk Iron & Steel Works (NKMK), and West-Siberian Iron & Steel Works (ZSMK). Even so, the adequacy of the obtained dependences is proved. It is proposed to use them to optimize the petrographic charge factors by various optimality criteria of the coke quality indices.

Ключевые слова: показатели качества кокса $М_{25}$, $М_{10}$; математические модели для прогнозирования показателей качества кокса $М_{25}$ и $М_{10}$; прогнозирующая способность математических моделей; петрографические параметры шихты; нейронные сети.

Keywords: M_{25} and M_{10} coke quality indices, mathematical models for predicting M_{25} and M_{10} coke quality indices, predictive power of mathematical models, petrographic charge factors, neural networks.

Образец для цитирования: Степанов, Е. Н. Построение математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса $М_{25}$ и $М_{10}$ / Е. Н. Степанов, А. Н. Смирнов, Д. И. Алексеев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 1. — С. 77−84.

For citation: E.N. Stepanov, A.N. Smirnov, D.I. Alekseev. Construction of mathematical models to predict M_{25} and M_{10} coke quality indices. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.1, pp. 77−84.

Введение. В настоящее время на коксохимических производствах (КХП) проводятся мероприятия по снижению себестоимости производимой продукции [1–3]. Оптимальные параметры этой работы на КХП ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) могут быть определены с помощью адекватной математической модели. Предполагается, что она будет описывать процессы превращения угольной шихты в кокс и формирования его прочностных свойств.

Материалы и методы. Выбор и обоснование независимых параметров для построения математических моделей. В [4] на основе построения и применения адаптивной модели установлен следующий факт. На точность прогнозирования показателей качества кокса влияют только петрографические параметры шихты, а не данные технического и пластометрического анализов. В связи с этим при построении моделей для прогнозирования показателей качества кокса $М_{25}$ и $М_{10}$ в качестве независимых переменных выбраны следующие петрографические характеристики шихты: сумма отощающих компонентов (ОК %) и показатель отражения витринита (R_0 %).

Многолетние данные о работе КХП ММК для 7-бис, 8-бис, 13-й и14-й батарей позволяют утверждать, что существует тесная взаимосвязь между показателями качества кокса $М_{25}$, $М_{10}$ и ОК, R_0 соответственно.

Выбор и обоснование вида математического уравнения для построения модели. В работах [3, 5, 6, 7] было установлено, что линейные уравнения в качестве моделей неадекватно описывают зависимости прочностных свойств кокса от шихтовых параметров. Поэтому математическую модель будем строить в виде:

$$\mathrm{М}_{25} = f(x)\,, \qquad (1)$$

$$\mathrm{М}_{10} = f(x)\,, \qquad (2)$$

где f — нелинейная функция; x — петрографический параметр ОК или R_0.

В работах [3, 6–13] с помощью множественного регрессионного анализа были найдены зависимости по типу (1) и (2) от нескольких независимых переменных. В настоящее время искусственная нейронная сеть является самым современным и удобным алгоритмом обработки информации (с учетом имеющихся прикладных пакетов программ для ЭВМ) [14, 15]. Это объясняет применение нейронных сетей в данной работе. В промышленных условиях работы коксовой батареи одному входному параметру, например ОК, может соответствовать несколько значений $М_{25}$, $М_{10}$. Это объясняется возможной неравномерностью состава шихты, насыпной плотности по ширине и высоте камеры коксования и другими факторами. В таком случае нейронные сети будут выступать в качестве сглаживателя данных [15]. Под термином «искусственная нейронная сеть» («нейронная сеть») в представленной работе будет подразумеваться зависимость по типу (1) или (2).

Результаты исследования. Построение математических моделей, проверка их адекватности и работоспособности. Данные КХП ММК фиксировались в течение 2011–2013 годов. На их основе с помощью программы *MATLAB* в пакете *Neural Network Tool* для каждой коксовой батареи (табл. 1) подбиралась своя полносвязная нейронная сеть. В такой сети отсутствуют пропуски связи между слоями нейронов и сигнал (числовое значение) с каждого нейрона из предыдущего слоя участвует в формировании сигнала (числового значения) каждого нейрона в следующем слое.

Таким образом, следует подчеркнуть, что при создании моделей для коксовых батарей не использовался инструментарий встраивания априорной информации об объекте исследования в нейронные сети. Они применялись для современного и удобного нахождения зависимостей между независимыми параметрами и показателями качества кокса.

Таблица 1

Table 1

Характеристики подобранных одномерных математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25}, M_{10} для коксовых батарей, обслуживаемых 1-м блоком углеподготовительного центра (УПЦ) КХП ММК

Characteristics of created 1D mathematical models for predicting M_{25} and M_{10} coke quality indices for coke batteries operated by the 1st block of coal preparation centre (CPC) of CCP MMK

Характеристика		Номер коксовой батареи					
		7-бис		8-бис		13–14	
		M_{25}	M_{10}	M_{25}	M_{10}	M_{25}	M_{10}
Независимая переменная, от которой строилась модель		OK		OK		R_0	
Архитектура нейронной сети[1]		$t1$–$t1$–$t1$	$t1$–$t3$–$t1$	$t1$–$t2$–$t1$	$t1$–$t3$–$t1$	$t1$–$t3$–$t1$	$t1$–$t3$–$t1$
Среднее значение ошибки описания[2]		–0,0275	0,0355	–0,0046	–0,0215	–0,0146	0,0093
Среднеквадратическое отклонение ошибки описания		0,5954	0,3952	0,6212	0,3910	0,9311	0,3159
Вероятность того, что мера расхождения χ^2 для ошибки описания не меньше, чем зафиксированная[3]		0,3063 (12)	0,3590 (17)	0,2312 (20)	0,7648 (16)	0,00001 (14) 0,00000 (10) 0,00001 (20) 0,00003 (50) 0,00001 (100)[4]	0,5175 (14)
Интервал попадания ошибки описания	$p = 0,95$	(–1,20; 1,15)	(–0,7; 0,8)	(–1,23; 1,22)	(–0,8; 0,7)	—	(–0,61; 0,63)
	$p = 0,997$	(–1,82; 1,76)	(–1,15; 1,22)	(–1,87; 1,87)	(–1,20; 1,15)	—	(–0,94; 0,96)
Значение ошибки прогнозирования на новой выборке (месячные данные за 2014 год): минимальное отрицательное / максимальное положительное		–0,8 / 0,8	–0,4 / 0,3	–0,8 / 0,7	–0,4 / 0,3	–0,8 / 1,0	–0,3 / 0,3

---

[1] В ошибки описания с нормальным законом распределения [16].обозначении архитектуры нейронной сети литера *t* обозначает, что в качестве передаточной функции на данном слое использовался гиперболический тангенс. Например, архитектура t1–t3–t1 означает, что в сети имеется три слоя нейронов: t1– входной слой, t3 скрытый слой, –t1 выходной слой. Во входном слое имеется 1 нейрон, в скрытом слое — 3 нейрона, в выходном — 1. Для прогнозирования параметра M_{25} для батареи 8-бис была подобрана особенная архитектура: в скрытом слое не три, как у всех остальных моделей, а два нейрона.

[2] Ошибка описания — принятый в данной статье термин, обозначающий разницу между прогнозируемым значением какого-либо показателя качества кокса, полученным с помощью математической модели, и фактическим из выборки, на которой строилась модель.

[3] В скобках указано число разрядов, на котором строился статистический ряд.

[4] При данном значении вероятности можно утверждать, что распределение ошибки описания не согласуется с нормальным законом распределения. Значение приводимой вероятности может несколько зависеть от количества разрядов, на котором строился статистический ряд. Поэтому приведено несколько значений вероятности в зависимости от числа разрядов, для того чтобы в полной мере убедиться в адекватности сделанного вывода о несогласованности тестового множества, которое было случайным образом сформировано из входных данных [15]. Для каждой модели была выбрана только одна независимая переменная (ОК или R_0), и нейронные сети использовались для сглаживания данных. Учитывая это, нейронная сеть заведомо не должна быть большой. Для малых нейронных сетей наиболее эффективен (сходимость, затраты машинного времени) алгоритм обучения Левенберга — Марквардта [15], который и был использован в данной работе при построении моделей. Поскольку результаты обучения зависят от начальных значений весов, то обучение на одной архитектуре нейронной сети происходило несколько раз после случайной инициализации весов. В качестве конечного результата оставлялись только те наборы коэффициентов в нейронной сети, при которых для данной архитектуры было наименьшее значение дисперсии (*mean square error — MSE* в *MATLAB*) в обучающей выборке. Коэффициент обучения не изменялся, использовались настройки по умолчанию. Всего с целью обучения и нахождения нейронных сетей было взято по 157–168 значений для каждой батареи.

Для выбора нейронной сети использовались следующие дополнительные критерии:
— подтверждение гипотезы о соответствии величины ошибки описания нормальному закону распределения по критерию χ^2;
— попадание максимального по модулю значения ошибки прогнозирования[5] на новой выборке (месячные данные КХП ММК за 2014 год) в интервал ошибки описания для данной модели (см. табл. 1).

В ходе поиска модели для 13–14-й батареи по показателю M_{25} не удалось подобрать соответствующую нейронную сеть, чтобы ошибка описания соответствовала нормальному распределению. Однако применение данной модели к новой выборке (данные 2014 года) показало удовлетворительную прогнозирующую способность. Отмеченные значения аппроксимированы с помощью нейронных сетей. Это позволило прогнозировать показатели качества кокса M_{25} и M_{10} для коксовых батарей 7-бис, 8-бис, 13-й и 14-й батарей. Результаты приведены на рис. 1–4.

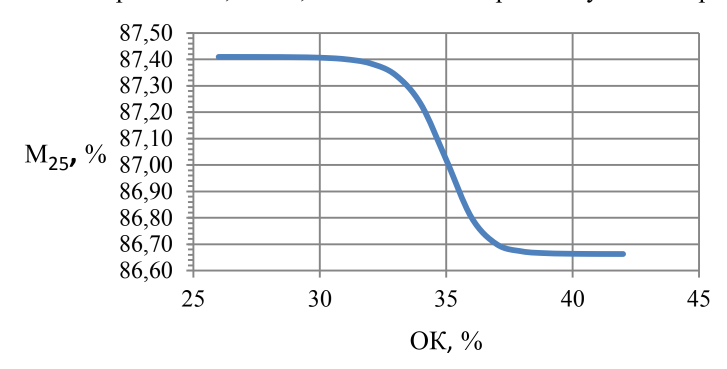


Рис. 1. Результаты аппроксимации отмеченных значений показателя дробимости кокса M_{25} по сумме отощающих компонентов шихты ОК для 7-бис и 8-бис батарей с помощью нейронных сетей

Fig.1. Approximation results of observed values of M_{25} impact coke strength by sum of inert components of OK charge for 7-bis and 8-bis batteries using neural networks

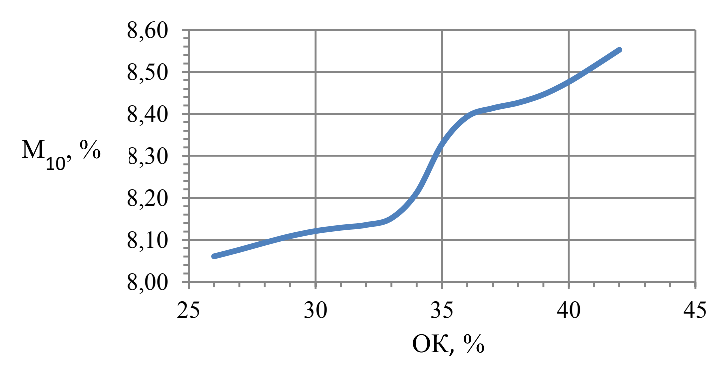


Рис. 2. Результаты аппроксимации отмеченных значений показателя истираемости кокса M_{10} по сумме отощающих компонентов шихты ОК для 7-бис и 8-бис батарей с помощью нейронных сетей

Fig. 2. Approximation results of observed values of M_{10} coke abrasion index by sum of inert components of OK charge for 7-bis and 8-bis batteries using neural networks

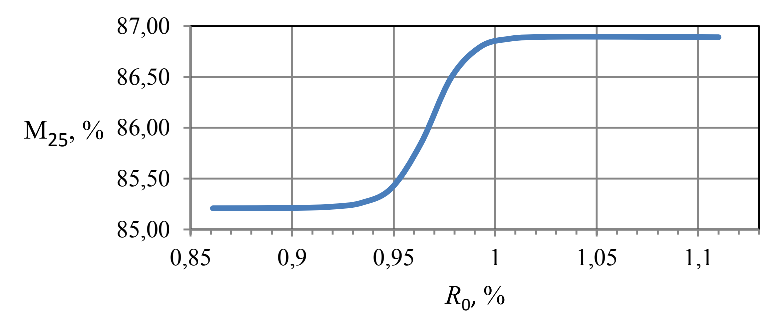


Рис. 3. Результаты аппроксимации отмеченных значений показателя дробимости M_{25} кокса по показателю отражения витринита шихты R_0 для 13–14-й батарей с помощью нейронных сетей

Fig. 3. Approximation results of observed values of M_{25} impact coke strength by R_0 charge vitrinite reflectance for 13-14th batteries using neural networks

[5]Под термином «ошибка прогнозирования» в данной работе подразумевается разница между прогнозируемым значением какого-либо показателя качества кокса, полученным с помощью математической модели, и фактическим из новой выборки, которая не использовалась для построения модели.

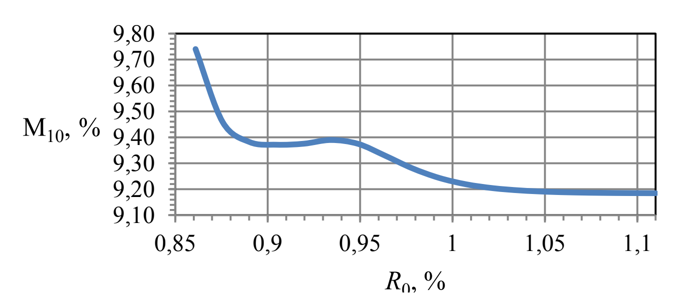


Рис. 4. Результаты аппроксимации наблюденных значений для показателя истираемости M_{10} кокса от показателя отражения витринита шихты R_0 для 13–14-й батареи с помощью нейронных сетей

Fig. 4. Approximation results of observed values for of M_{10} coke abrasion index from R_0 charge vitrinite reflectance for the 13-14th batteries using neural networks

Итак, для 7-бис и 8-бис батарей (рис. 1, 2) видно, что с ростом ОК значение M_{25} уменьшается, а M_{10} увеличивается. Это соответствует методике определения M_{25} и M_{10} по ГОСТ 5953-93 (ИСО 556-80). Аналогичные рассуждения можно провести для 13–14-й батарей (рис. 3, 4). Таким образом, модели, представленные на рис. 1–4, можно считать адекватными, исходя из их непротиворечия описанию зависимых переменных, прогнозированию на новой выборке и в сравнении (форма кривых) с моделями других коксохимических производств [11, 12, 17].

Обсуждение и заключения. Сравнение прогнозирующих способностей полученных математических моделей с аналогичными моделями, построенными для других коксохимических производств. В табл. 2 приведены прогнозирующие способности некоторых математических моделей, относящихся к разным КХП, исходя из их ошибок описания и прогнозирования.

Таблица 2
Table 2

Прогнозирующая способность некоторых математических моделей для показателей качества кокса, исходя из их ошибок описания и прогнозирования

Predictive force of some mathematical models for coke quality indicators based on their description forecast errors

Источник	КХП	Показатели качества кокса	Среднеквадратическое отклонение ошибки		Максимальное абсолютное отклонение при доверительной вероятности $p = 95$ % для ошибки	
			описания, %	прогнозирования, %	описания	прогнозирования
[3]	Алтай-Кокс	M_{40}	1,2	1,5	2,4[1]	3,0
		M_{25}	1,0	1,13	2,0[1]	2,26
		M_{10}	0,8	0,74	1,6[1]	1,48
[7]	НТМК	M_{25}	0,94 (0,88)[6]	—	1,88[1]	—
		M_{10}	0,75 (0,57)[7]	—	1,50[1]	
[8]	НКМК	M_{25}	0,93	0,84	1,86[1]	1,7
		M_{10}	0,62	0,55	1,24[1]	1,1
[9]	ЗСМК	M_{40}	0,87	—	1,8	—
		M_{10}	0,30	—	0,6	—
[10]	Евраз[7]	M_{40}	0,86	—	1,72	—
		M_{25}	0,82	—	1,64	—
		M_{10}	0,46	—	0,92	—
[11][8]	НТМК	M_{40}	0,97	0,89	1,94[9]	1,78
		M_{10}	0,38	0,34	0,76[7]	0,68
[13]	ЗСМК	M_{40}	0,72	—	2,04	—
		M_{10}	0,34	—	0,96	—

С учетом тестирования на новой выборке по данным за 2014 год прогнозирующая способность моде-

[6] В оригинальной работе подобная характеристика не приводится. При расчете исходили из удвоенного значения среднеквадратического отклонения (правило двух сигм).
[7] В скобках указаны остаточные дисперсии, которые приводились в оригинальной работе.
[8] ООО «ЕвразХолдинг» — компания, владеющая НТМК, НКМК, ЗСМК.
[9] Приводятся характеристики для модели с лучшей прогнозирующей способностью.

лей, созданных для КХП ММК по показателям M_{25} и M_{10} (табл. 1), не уступает аналогам (табл. 2). Таким образом, модели, представленные на рис. 1–4, адекватны для нахождения оптимальных петрографических параметров шихты 1-го блока УПЦ и прогнозирования.

Выводы.

1. Показана возможность построения математических моделей на основе только петрографических параметров шихты.

2. Результаты прогнозирования оценивались на выборке, которая не использовалась для построения моделей, и сравнивались с аналогичными моделями для других КХП [7–13]. Таким образом установлена адекватность построенных математических моделей (рис. 1–4).

3. Построенные математические модели для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} (рис. 1–4) адекватны для проведения оптимизации [6–10, 12, 13].

Библиографический список

1. Киселев, Б. П. Сырьевая база России. 1. Ретроспектива / Б. П. Киселев, В. А. Лапшин // Кокс и химия. — 1999. — № 11. — С. 2–9.

2. Киселев, Б. П. О некоторых аспектах угольной базы коксования России в 2008–2009 годах / Б. П. Киселев // Кокс и химия. — 2009. — № 12. — С. 9–15.

3. Оптимизация состава шихты для коксования и прогноз качества кокса по химико-петрографическим параметрам / А. С. Станкевич [и др.] // Кокс и химия. — 1998. — № 9. — С. 11–17.

4. Построение и исследование алгоритма прогнозирования показателей качества кокса с учетом динамики неконтролируемых возмущений / В. Ф. Евтушенко [др.] // Кокс и химия. — 1996. — № 6. — С. 21–26.

5. Смирнов, А. Н. Анализ принципов построения математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} с целью классификации и разработки концепции гибридной модели / А. Н. Смирнов, В. Н. Петухов, Д. И. Алексеев // Кокс и химия. — 2015. — № 5. — С. 13–18.

6. Станкевич, А. С. Распределение углей и составление угольных шихт для коксования с прогнозом качества кокса на основе линейного программирования / А. С. Станкевич, И. П. Мюллер, В. И. Лельчук // Кокс и химия. — 1981. — № 11. — С. 4–8.

7. Модель оптимизации показателей прочности кокса на основе химико-петрографических параметров углей и нелинейного программирования / А. С. Станкевич [и др.] // Кокс и химия. — 2000. — № 5. — С. 21–29.

8. Составление шихт для коксования на основе оптимизации и прогноза прочности кокса по химико-петрографическим показателям углей / А. С. Станкевич [и др.] // Кокс и химия. — 2002. — № 3. — С. 9–15.

9. Модель прогноза качественных характеристик металлургического кокса на основе химико-петрографических показателей угольной шихты / А. Е. Базегский [и др.] // Кокс и химия. — 2002. — № 9. — С. 15–22.

10. Рациональное распределение углей и оптимизация состава шихт для коксования / А. С. Станкевич [и др.] // Кокс и химия. — 2003. — № 9. — С. 8–16.

11. Прогноз прочности кокса на основе химико-петрографических параметров угольных шихт с учетом их пневмомеханической сепарации / А. С. Станкевич [и др.] // Кокс и химия. — 2005. — № 12. — С. 14–21.

12. Модель прогноза показателей CSR и CRI на основе химико-петрографических параметров угольных шихт и условий их коксования / А. С. Станкевич [и др.] // Кокс и химия. — 2008. — № 9. — С. 37–44.

13. Станкевич, А. С. Оптимизация качества кокса ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» с учетом особенностей угольной сырьевой базы / А. С. Станкевич, А. Е. Базегский // Кокс и химия. — 2013. — № 10. — С. 14–21.

14. Вуколов, Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL / Э. А. Вуколов. — 2-е. изд., испр. и доп. — Москва : Форум. 2008. — 464 с. — (Высшее образование).

15. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. — Москва : Финансы и статистика, 2002. — 344 с.

16. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — 10-е изд., стер. — Москва : Академия, 2005. — 576 с.

17. Смирнов, А. Н. Сопоставление и анализ адекватности математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} И M_{10} / А. Н. Смирнов, Д. И. Алексеев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2017. — Т. 15, № 3. — С. 62–67.

References

1. Kiselev, B.P., Lapshin, V.A. Syr'yevaya baza Rossii. 1. Retrospektiva. [Raw materials base of Russia. 1. Retrospective.] Coke and Chemistry, 1999, no. 11, pp. 2–9 (in Russian).

2. Kiselev, B.P. O nekotorykh aspektakh ugol'noy bazy koksovaniya Rossii v 2008–2009 godakh. [On some aspects of coal coking base of Russia in 2008-2009.] Coke and Chemistry, 2009, no. 12, pp. 9–15 (in Russian).

3. Stankevich, A.S., et al. Optimizatsiya sostava shikhty dlya koksovaniya i prognoz kachestva koksa po khimiko-petrograficheskim parametram. [Optimization of charge composition for coking and coke quality forecast on chemical-petrographic parameters.] Coke and Chemistry, 1998, no. 9, pp. 11–17 (in Russian).

4. Yevtushenko, V.F., et al. Postroenie i issledovanie algoritma prognozirovaniya pokazateley kachestva koksa s uchetom dinamiki nekontroliruemykh vozmushcheniy. [Construction and research of algorithm for predicting coke quality indicators taking into account of uncontrolled disturbances dynamics.] Coke and Chemistry, 1996, no. 6, pp. 21–26 (in Russian).

5. Smirnov, A.N., Petukhov, V.N., Alekseev, D.I. Analiz printsipov postroeniya matematicheskikh modeley dlya prognozirovaniya pokazateley kachestva koksa M25 i M10 s tsel'yu klassifikatsii i razrabotki kontseptsii gibridnoy modeli. [Classification of models for predicting coke quality (M25 and M10).] Coke and Chemistry, 2015, no. 5, pp. 13–18 (in Russian).

6. Stankevich, A.S., Myuller, I.P., Lelchuk, V.I. Raspredelenie ugley i sostavlenie ugol'nykh shikht dlya koksovaniya s prognozom kachestva koksa na osnove lineynogo programmirovaniya. [Distribution of coals and coal blending for coking with coke quality forecast based on linear programming.] Coke and Chemistry, 1981, no. 11, pp. 4–8 (in Russian).

7. Stankevich, A.S., et al. Model' optimizatsii pokazateley prochnosti koksa na osnove khimiko-petrograficheskikh parametrov ugley i nelineynogo programmirovaniya. [Model of optimization of coke strength indicators on the basis of coal chemical-petrographic parameters and non-linear programming.] Coke and Chemistry, 2000, no. 5, pp. 21–29 (in Russian).

8. Stankevich, A.S., et al. Sostavlenie shikht dlya koksovaniya na osnove optimizatsii i prognoza prochnosti koksa po khimiko-petrograficheskim pokazatelyam ugley. [Composition of coal charge materials and prediction of coke strength.] Coke and Chemistry, 2002, no. 3, pp. 9–15 (in Russian).

9. Bazegsky, A.E., et al. Model' prognoza kachestvennykh kharakteristik metallurgicheskogo koksa na osnove khimiko-petrograficheskikh pokazateley ugol'noy shikhty. [Model for predicting the characteristics of metallurgical coke.] Coke and Chemistry, 2002, no. 9, pp. 15–22 (in Russian).

10. Stankevich, A.S., et al. Ratsional'noe raspredelenie ugley i optimizatsiya sostava shikht dlya koksovaniya. [Rational distribution of coals and optimization of charge materials for coking.] Coke and Chemistry, 2003, no. 9, pp. 8–16 (in Russian).

11. Stankevich, A.S., et al. Prognoz prochnosti koksa na osnove khimiko-petrograficheskikh parametrov ugol'nykh shikht s uchetom ikh pnevmomekhanicheskoy separatsii. [Forecast of coke strength on the basis of chemical-petrographic parameters of coal blends taking into account their pneumomechanical separation.] Coke and Chemistry, 2005, no. 12, pp. 14–21 (in Russian).

12. Stankevich, A.S., et al. Model' prognoza pokazateley CSR i CRI na osnove khimiko-petrograficheskikh parametrov ugol'nykh shikht i usloviy ikh koksovaniya. [Forecast model of CSR and CRI indices on the basis of chemical-petrographic parameters of coal charges and coking conditions.] Coke and Chemistry, 2008, no. 9, pp. 37–44 (in Russian).

13. Stankevich, A.S., Bazegsky, A.E. Optimizatsiya kachestva koksa OAO «EVRAZ ZSMK» s uchetom osobennostey ugol'noy syr'yevoy bazy. [Optimizing coal production at OAO EVRAZ ZSMK on the basis of the available coal.] Coke and Chemistry, 2013, no. 10, pp. 14–21 (in Russian).

14. Vukolov, E.A. Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operatsiy s ispol'zovaniem paketov STATISTICA i EXCEL. [Fundamentals of statistical analysis. Workshop on statistical methods and investigation of operations using STATISTICA and EXCEL packages.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Forum. 2008, 464 p. (in Russian).

15. Osovskiy, S. Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii. [Neural networks for information processing.] Moscow: Finansy i statistika, 2002, 344 p. (in Russian).

16. Ventsel, E.S. Teoriya veroyatnostey. [Theory of probability.] 10th reimpression. Moscow: Akademiya, 2005, 576 p. (in Russian).

17. Smirnov, A.N., Alekseev, D.I. Sopostavlenie i analiz adekvatnosti matematicheskikh modeley dlya prognozirovaniya pokazateley kachestva koksa M_{25} i M_{10}. [Comparison and adequacy analysis of the mathematical

models for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices.] Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 62–67 (in Russian).

Поступила в редакцию 01.11.2017
Сдана в редакцию 03.11.2017
Запланирована в номер 15.01.2018

Received 01.11.2017
Submitted 03.11.2017
Scheduled in the issue 15.01.2018

Об авторах:

Степанов Евгений Николаевич,
старший менеджер по КХП группы АКДП ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», (РФ, 455002 г. Магнитогорск, ул. Кирова, 93), кандидат технических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1495-1037
stepanov.en@mmk.ru

Смирнов Андрей Николаевич,
заведующий кафедрой «Физическая химия и химическая технология» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (РФ, 455036 г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38), доктор физико-математических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7399-9586
sman@magtu.ru

Алексеев Данил Игоревич,
ассистент кафедры «Физическая химия и химическая технология» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, (РФ, 455036 г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7917-2299
alekseev41047@mail.ru

Authors:

Stepanov, Evgeny N.,
senior account manager on CCP, ACDP group, PAO “Magnitogorsk Iron & Steel Works”, (RF, 455002, Magnitogorsk, ul. Kirova, 93), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1495-1037
stepanov.en@mmk.ru

Smirnov, Andrey N.,
head of the Physical Chemistry and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University (RF, 455036, Magnitogorsk, pr. Lenina, 38), Dr.Sci. (Phys.-Math.), associate professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7399-9586
sman@magtu.ru

Alekseev, Danil I.,
teaching assistant of the Physical Chemistry and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University (RF, 455036, Magnitogorsk, pr. Lenina, 38),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7917-2299
alekseev41047@mail.ru